大豆浓缩蛋白替代鱼粉对黄颡鱼生长、饲料利用、消化酶和抗氧化酶活性的影响

李晨晨　黄文文　金　敏　朱婷婷　罗嘉翔　马红娜　袁　野　周歧存*[1]

(宁波大学海洋学院鱼类营养研究室，宁波 315211）

摘　要：本试验旨在探讨大豆浓缩蛋白质(SPC)替代鱼粉对黄颡鱼生长性能、饲料利用、血清生化指标、全鱼和肌肉常规营养成分、消化酶和抗氧化活性的影响。试验设计 6 组等氮等脂饲料，SPC 替代鱼粉水平分别为 0、10%、20%、30%、40%和 60%。选用初始体重为（2.17±0.02） g 的黄颡鱼幼鱼 540 尾，随机分为 6 组，每组 3 个重复，每个重复（养殖桶）放养 30 尾黄颡鱼幼鱼，进行为期 8 周的投喂试验。结果表明：1）随着 SPC 替代鱼粉水平的升高，黄颡鱼成活率、饲料效率、蛋白质效率、肥满度、脏体比、肠脂比均无显著变化(P>0.05)；当饲料中 SPC 替代鱼粉水平不超过 20%时，增重率和特定生长率无显著变化(P>0.05)，而当替代水平提高到 30%以上时，这 2 个指标均显著降低(P<0.05)。2）SPC 替代鱼粉水平对黄颡鱼全鱼干物质、粗蛋白质和灰分，肌肉干物质、粗蛋白质和粗脂肪含量的影响不显著(P>0.05)；然而，当 SPC 替代鱼粉水平从 10%升高至 20%和 30%时，全鱼粗脂肪含量显著降低(P<0.05)，当 SPC 替代鱼粉水平从 10%升高至 20%以上时，肌肉灰分含量显著降低(P<0.05)。3）SPC 替代鱼粉水平对血清葡萄糖、总胆固醇含量及谷丙转氨酶活性有显著影响(P<0.05)；血清葡萄糖含量在 SPC 替代鱼粉水平为 30%时达到最大值；随 SPC 替代鱼粉水平的升高，血清谷丙转氨酶活性总体呈上升趋势，总胆固醇含量总体呈现下降的趋势。4）血清超氧化物歧化酶活性与过氧化物酶活性在 SPC 替代 30%组达到最大值，血清丙二醛含量达到最小值，与对照组差异显著(P<0.05)。5）各组间胃蛋白酶活性无显著差异(P>0.05)；SPC 替代鱼粉水平对胃淀粉酶、前肠淀粉酶及肝脏淀粉酶活性有显著影响(P<0.05)，当 SPC 替代鱼粉水平为 10%时，胃淀粉酶活性达到最大值，前肠淀粉酶活性为最小值，肝脏淀粉酶活性在 SPC 替代鱼粉水平为 40%时为到最小值。本试验结果表明，SPC 替代 20%鱼粉(饲料中 SPC 的添加量为 10.72%)对黄颡鱼生长性能、消化酶、抗氧化酶活性等无不良影响。

关键词：黄颡鱼；大豆浓缩蛋白质；生长性能；饲料利用；酶活性

收稿日期：2017-07-11
基金项目：国家自然科学基金项目(31272670)；宁波市农业科技攻关重大项目(2012C10025)；国家科技部星火重大计划项目(2014GA701001)；浙江省重中之重一级学科(水产)开放基金
作者简介：李晨晨(1993-)，女，安徽马鞍山人，硕士研究生，从事水生动物营养与饲料研究。E-mail: 1076030698@qq.com
*通信作者：周歧存，教授，博士生导师，E-mail: zhouqicun@nbu.edu.cn

中图分类号：S816

黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)是我国内陆的一种小型淡水经济鱼类[1]，其隶属鲇形目(Siluriformes)，鲿科(Bagridae)，黄颡鱼属(*Pelteobagrus bleeker*)，在我国俗称嘎牙子、黄腊丁、嘎鱼等。属于温水性底层鱼类，喜栖息于缓流或者静水中，其肉质细腻、口感鲜美、营养价值高、无肌间刺等优点[2]，深受人们的喜爱，具有很大的市场潜力。近年来，黄颡鱼的养殖规模迅速扩大[3]，成了内陆淡水地区一种重要的养殖品种。

鱼粉是一种优质的蛋白质来源，可以广泛的应用于水产饲料中。随着水产养殖行业的不断发展，对水产饲料的需求越来越大，对鱼粉的需求量也不断增加。但由于资源的减少以及过度捕捞，使得鱼粉供应不足，市场价格高昂。为有效降低水产饲料的成本，寻求其他可靠的蛋白质源部分或全部替代鱼粉，成为一个必然的趋势。豆粕的蛋白质含量高，氨基酸相对较为平衡。菜籽粕也是广泛用于淡水鱼类的植物蛋白质源，但在实际生产中，菜籽粕经常与大豆蛋白质混合使用以达到最适的氨基酸平衡[4]；在日本鲈鱼[5]等鱼类的研究中表明，菜籽粕可以替代一定比例的鱼粉。棉籽粕是继豆粕、菜籽粕之后的第 3 大植物蛋白质源。在中国，每年棉籽粕的产量都在 600 万 t 以上[6]。现有的研究表明，棉籽粕可以替代一定比例的鱼粉[7-8]。限制棉籽粕使用的主要因素是其内较高含量的棉酚，棉酚通常以多酚二醛的形式存在。近年来研究发现，以豆粕为代表的植物蛋白质源替代鱼粉会破坏鱼类消化和代谢系统的组织结构，抑制鱼类消化和代谢能力，鱼类对含有豆粕的饲料，表现出摄食率、消化率降低[9]。

SPC 是由大豆制作而成的，品质稳定，氨基酸消化率高、抗营养因子含量极低[10-11]。SPC 除去豆腥味物质及大豆的胀气因子，粗蛋白质含量一般为 65%～70%[12-13]。由于去除豆粕中大部分的可溶性碳水化合物、粗纤维、抗营养因子等影响水生动物对植物蛋白质源吸收利用的物质，SPC 在水产饲料行业中具有很好的应用前景[12]。SPC 虽然氨基酸含量丰富，但氨基酸平衡远不如鱼粉，某些必需氨基酸含量仍然不足，尤其是蛋氨酸含量不到优质鱼粉含量的一半[14-15]。在多种鱼类的研究中发现，SPC 虽可以替代 25%~100%的鱼粉[16-18]，但 SPC 部分或全部替代鱼粉时结果差异较大[12,16,19]。在瓦式黄颡鱼的研究中发现 SPC 替代鱼粉对幼鱼存活率的影响不显著，但对生长以及摄食产生了显著影响[13]。本试验在前述研究的基础上，通过在饲料中添加赖氨酸和蛋氨酸，保证必需氨基酸供给充足的前提下，探讨 SPC 替代鱼粉水平对黄颡鱼生长、饲料利用、消化酶和抗氧化活性的影响，从而为研制高效环保黄颡鱼配合饲料提供科学的依据。

1　材料与方法

1.1　试验饲料

以鱼粉、豆粕和鱿鱼粉为蛋白质源，鱼油和大豆卵磷脂为脂肪源，面粉为糖源，配制成 6 组等氮等脂的饲料(粗蛋白质 45%，粗脂肪 10%)。以饲料鱼粉含量为 50%为对照组，SPC 替代鱼粉水平分别为 10.0%、20.0%、30.0%、40.0%和 60.0%，同时在替代组中分别添加蛋氨酸和赖氨酸，使其蛋氨酸和赖氨酸含量与对照组饲料一致。试验饲料组成及营养成分见表 1，试验饲料的氨基酸组成见表 2。饲料原料粉碎后过 60 目筛，按照配方表 1 称取各种饲料原料，微量添加成分采取逐级扩大法混合均匀，添加 35%左右的水混匀后，压制成粒径为 2~3 mm 的颗粒饲料。自然风干至含水分约 10%，分组置于封口袋中并放于-20 ℃冰柜冷冻保存备用。

表 1 试验饲料组成及营养水平(干物质基础)

Table 1 Composition and nutrient levels of experimental diets (DM basis) %

项目 Items	大豆浓缩蛋白质替代鱼粉水平 Replacement level of fish meal with SPC/%					
	0	10	20	30	40	60
原料 Ingredients						
秘鲁鱼粉 Peru Fish meal	50.00	45.00	40.00	35.00	30.00	20.00
大豆浓缩蛋白质 SPC[1]		5.36	10.72	16.08	21.44	32.17
面粉 Wheat powder	28.07	28.07	28.07	28.07	28.07	28.07
豆粕 Soybean meal	5.55	5.55	5.55	5.55	5.55	5.55
鱿鱼粉 Squid meal	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
鱼油 Fish oil	2.52	2.98	3.44	3.91	4.37	5.29
大豆卵磷脂 Soy lecithin	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
维生素预混料 Vitamin premix[2]	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
矿物质预混料 Mineral premix[2]	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50
赖氨酸 Lysine[3]		0.05	0.10	0.15	0.19	0.29
蛋氨酸 Methionine[3]		0.05	0.11	0.16	0.22	0.33
氯化胆碱 Choline chloride	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
磷酸二氢钙 $Ca(H_2PO_4)_2$	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
纤维素 Cellulose	5.56	4.64	3.71	2.78	1.86	
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels[4]						
干物质 Dry matter	89.82	90.26	90.19	90.26	89.87	89.94

粗蛋白质 Crude protein	45.39	46.01	45.83	45.72	46.13	46.13
粗脂肪 Crude lipid	10.10	10.04	10.04	10.07	10.16	10.27
灰分 Ash	11.63	11.83	10.07	10.13	9.93	9.24

1)SPC 采购于益海(泰州)粮油工业有限公司。SPC was purchased from *Yihai* (*Taizhou*) grain and oil industry Co., Ltd..

2) 维生素预混料和矿物质预混料组成参考黄文文等[20]。Vitamin premix and mineral premix composition referred to HUANG et al[20].

3) 赖氨酸和蛋氨酸为 *L* 晶体形式，纯度≥99%。Lysine and methionine were *L*-crystal style, and purity≥99%.

4) 营养水平均为实测值。 Nutrient levels were all measured values.

表 2　试验饲料的氨基酸组成(干物质基础)

Table 2　Amino acid composition of experimental diets (DM basis)　　%

氨基酸 Amino acids	大豆浓缩蛋白质替代鱼粉水平 Replacement level of fish meal with SPC/%					
	0	10	20	30	40	60
必需氨基酸 Essential amino acid						
苏氨酸 Threonine	1.59	1.57	1.64	1.59	1.61	1.60
赖氨酸 Lysine	2.75	2.72	2.82	2.78	2.78	2.77
苯丙氨酸 Phenylalanine	1.73	1.78	1.82	1.91	1.95	2.05
精氨酸 Arginine	2.22	2.26	2.43	2.43	2.48	2.60
蛋氨酸 Methionine	1.07	1.06	1.08	1.04	1.02	1.09
亮氨酸 Leucine	3.04	3.05	3.20	3.18	3.20	3.26
异亮氨酸 Isoleucine	1.60	1.64	1.72	1.73	1.71	1.76
组氨酸 Histidine	0.79	0.81	0.87	0.88	0.89	0.94
缬氨酸 Valine	1.86	1.88	1.94	1.93	1.88	1.87
非必需氨基酸 Nonessential amino acid						
天门冬氨酸 Aspartic acid	3.42	3.48	3.72	3.72	3.81	3.98
丝氨酸 Serine	1.65	1.67	1.80	1.79	1.86	1.95
谷氨酸 Glutamic acid	6.89	7.09	7.56	7.59	7.72	8.10
甘氨酸 Glycine	2.39	2.29	2.33	2.20	2.13	2.00
丙氨酸 Alanine	2.38	2.28	2.32	2.20	2.14	2.01
酪氨酸 Tyrosine	1.17	1.19	1.24	1.27	1.29	1.35
脯氨酸 Proline	1.92	1.94	2.04	2.03	2.06	2.13
半胱氨酸 Cystine	0.35	0.36	0.38	0.38	0.40	0.39

1.2 饲养管理

试验所用黄颡鱼鱼苗购自浙江省嘉兴市，于宁波大学鱼类营养研究室淡水养殖基地养殖车间进行投喂试验。试验前黄颡鱼苗用商品饲料(宁波天邦股份有限公司，粗蛋白质含量 45%，粗脂肪含量 10%)暂养 2 周，分组前停食 24 h，挑选体格健壮、规格基本一致的个体 540 尾[初始重量约为(2.17±0.02) g]，每个 300 L 玻璃钢养殖桶中随机放养 30 尾，每组饲料随机投喂 3 个养殖桶里的试验鱼，即每组的 3 个重复。每天投喂 2 次，日投喂量为其体重的 4%~6%，投喂时间分别为 07:30 和 17:00，投喂后 1 h 内观察其摄食情况，养殖前期每隔 1 d 换水 50%左右，养殖中后期每天换水量 50%~100%。养殖期间每天检查充气和水温情况，及时记录死鱼数量及重量，投喂周期为 8 周。每 2 周称重、计数并以此次调整随后 2 周饲料投喂量。试验期间，不间断充氧以保证水体中含有足够的溶解氧(>6.0 mg/L)，水温为 23.0~29.5 ℃，pH 为 7.5~8.0。

1.3 样品采集与分析方法

投喂试验结束后，鱼停食 24 h，取样前每桶单独称重并计数，计算增重率、特定生长率、存活率、饲料效率及蛋白质效率。每个试验桶随机取 3 尾鱼分别测出其体长和体重，剥离内脏团和肠系膜脂肪称重，用于计算脏体比、肠脂比和肥满度；剥离肌肉(无皮肤的背部肌肉)置于封口袋，用于肌肉常规营养成分的分析。每桶随机取 4 尾鱼置于封口袋中，用于全鱼常规营养成分的分析。另每个试验桶随机取 3 尾鱼，分别剥离肝脏、胃、前肠于 1.5 mL 离心管中，用于抗氧化酶及消化酶活性的检测。用注射器抽取 5~8 尾鱼的血液注入 1.5 mL 离心管中，于 4 ℃下静置过夜后 5 000 r/min 离心 10 min，取上清液保存于-80 ℃备用，用于血清中生化指标的分析。

饲料、肌肉及全鱼常规营养成分分析：水分含量测定采用 105 ℃常压干燥法；粗蛋白质含量测定采用蛋白质分析仪(FP-528，美国 LECO 公司)；粗脂肪含量测定采用索氏抽提法；粗灰分含量测定采用 550 ℃马福炉灼烧法。饲料样品中氨基酸含量采用高速氨基酸自动分析仪(L-8900，日本 HITACHI 公司)进行测定。

血清中生化指标分析：总蛋白、白蛋白、球蛋白、总胆固醇和甘油三酯含量均由宁波大学附属医院使用全自动生化分析仪(7600-110，日本 HITACHI 公司)测定。谷丙转氨酶、谷草转氨酶活性均采用南京建成生物工程研究所生产的相关试剂盒测定，相应操作均参照说明书进行。

肝脏抗氧化指标分析：超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性及丙二醛含量均采用南京建成生物工程研究所生产的相关试剂盒测定，相应操作均参照说明书进行。

消化酶活性分析：胃蛋白酶、淀粉酶活性均采用南京建成生物工程研究所生产的相关试剂盒测定，相应操作均参照说明书进行。

1.4 计算公式

摄食率(feed intake,d^{-1})=摄入的干物质含量/[饲养天数×(终末体重+初始体重)/2]；

增重率(weight gain rate,WGR,%)=100×(终末均重-初始均重)/初始均重；

特定生长率(specific growth rate,SGR,%/d)=100×(ln 终末体重-ln 初始体重)/饲养天数；

蛋白质效率(protein efficiency ratio,PER)=(终末体重-初始体重)/蛋白质摄入量；

饲料效率(feed efficiency,FE)=(终末总重+死亡总重-初始总重)/(投饲总量×饲料干物质含量)；

肥满度(condition factor,CF,g/cm^3)=100×体重/体长^3；

肠脂比(intraperitoneal fat ratio,IPF,%)=100×肠脂/体重；

脏体比(viserosomatic index,VSI,%)=100×内脏团/体重；

1.5 数据统计分析

采用 SPSS 17.0 软件对所有数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)，当处理之间有差异显著时，进行 Duncan 多重比较。以 P<0.05 作为差异显著判断标准。结果以平均值±标准差(mean±SD)表示。

2 结 果

2.1 SPC 替代鱼粉对黄颡鱼生长性能、饲料利用以及形态学指标的影响

各组黄颡鱼成活率均为 100%。表 3 的结果表明，随着饲料中 SPC 替代鱼粉水平增加，摄食率、饲料效率和蛋白质效率各组间无显著差异(P>0.05)。增重率和特定生长率随 SPC 替代鱼粉水平升高而降低，当 SPC 替代鱼粉水平不超过 20%时，增重率和特定生长率无显著变化(P>0.05)，而当饲料中 SPC 替代鱼粉水平提高到 30%以上时，这 2 个指标显著降低(P<0.05)，提高到 60%时，增重率较其他替代水平显著降低(P<0.05)。黄颡鱼肥满度、脏体比与肠脂比在各试验组间无显著差异(P>0.05)，但均有随 SPC 替代鱼粉水平升高而下降的趋势。

表 3 大豆浓缩蛋白质替代鱼粉对黄颡鱼生长性能、饲料利用以及形体指标的影响

Table 3 Effects of fish meal replacement with SPC on growth performance, feed utilization and morphological indicators of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) (n=3)

项目 Items	大豆浓缩蛋白质替代鱼粉水平 Replacement level of fish meal with SPC/%

	0	10	20	30	40	60
初重 Initial weight/g	2.17±0.00	2.18±0.01	2.16±0.00	2.18±0.01	2.18±0.01	2.17±0.00
摄食率 Feed intake/d^{-1}	0.73±0.04	0.73±0.03	0.73±0.00	0.77±0.03	0.78±0.02	0.79±0.04
增重率 Weight gain/%	755.30±26.47^{a}	702.19±12.29^{a}	693.54±54.28^{a}	647.06±38.09^{b}	640.14±24.09^{b}	619.31±12.36^{c}
特定生长率 SGR/(%/d)	3.80±0.27^{a}	3.71±0.25^{a}	3.70±0.12^{a}	3.58±0.23^{b}	3.57±0.18^{b}	3.51±0.29^{b}
饲料效率 FE	1.05±0.02	1.14±0.04	1.12±0.05	1.03±0.06	1.04±0.08	1.09±0.01
蛋白质效率 PER	2.20±0.04	2.33±0.07	2.29±0.11	2.12±0.13	2.11±0.15	2.08±0.25
肥满度 CF/(g/cm^3)	1.74±0.08	1.76±0.07	1.74±0.06	1.66±0.04	1.65±0.08	1.67±0.02
脏体比 VSI/%	6.02±0.35	6.30±0.49	5.77±0.41	5.58±0.42	6.07±0.33	5.57±0.07
肠脂比 IPE/%	1.74±0.08	1.76±0.07	1.74±0.06	1.66±0.04	1.65±0.08	1.67±0.02

同行数据肩标无字母或相同字母表示差异不显著(P>0.05)，不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。下表同。

In the same row, values with no letter or the same letter superscripts mean no significant difference (P>0.05), while with different small letter superscripts mean significant difference (P<0.05). The same as below.

2.2 SPC 替代鱼粉对黄颡鱼全鱼和肌肉常规营养成分的影响

表 4 的结果表明，SPC 替代鱼粉水平对全鱼干物质、粗蛋白质及灰分含量无显著影响(P>0.05)，但对全鱼粗脂肪含量有显著影响(P<0.05)。与对照组相比，试验组全鱼粗脂肪含量无显著差异(P>0.05)，但 SPC 替代鱼粉水平为 20%和 30%时低于高于 10%时(P<0.05)。SPC 替代鱼粉水平对黄颡鱼肌肉干物质、粗蛋白质与粗脂肪含量影响不显著(P>0.05)，但对肌肉灰分含量有显著影响(P<0.05)。当 SPC 替代鱼粉水平为 10%时，肌肉灰分含量与对照组无显著差异(P>0.05)，当 SPC 替代鱼粉的水平由 10%提高到 20%以上时，肌肉灰分含量显著下降(P<0.05)。

表 4 大豆浓缩蛋白质替代鱼粉对黄颡鱼全鱼和肌肉常规营养成分的影响

Table 4 Effects of fish meal replacement with SPC on common nutrient composition of whole body and muscle of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) (n=3) %

项目 Items	大豆浓缩蛋白质替代鱼粉水平 Replacement level of fish meal with SPC/%					
	0	10	20	30	40	60
全鱼 Whole body						
干物质 Dry matter	29.54±1.17	27.28±1.60	26.91±2.11	28.32±0.27	27.84±0.69	29.01±0.98
粗蛋白质 Protein	13.96±0.63	13.80±0.33	13.08±0.90	14.00±0.08	13.78±0.49	13.95±0.35
粗脂肪 Lipid	11.21±0.90^{ab}	12.69±1.29^{a}	10.03±0.97^{b}	10.15±0.40^{b}	10.61±0.39^{ab}	10.71±0.86^{ab}
灰分 Ash	12.04±0.19	11.75±0.69	11.86±0.04	12.12±0.24	11.87±0.37	11.67±0.64
肌肉 Muscle						

干物质 Dry matter	20.65±0.03	21.21±0.55	20.64±0.23	21.11±0.49	21.00±0.32	21.23±0.44
粗蛋白质 Protein	17.21±0.50	17.19±0.38	17.32±0.17	17.77±0.20	17.48±0.36	17.89±0.17
粗脂肪 Lipid	2.63±0.17	2.72±0.18	2.82±0.06	2.78±0.03	2.86±0.05	2.82±0.07
灰分 Ash	6.02 ± 0.06^{bc}	6.25 ± 0.25^{c}	5.84 ± 0.13^{ab}	5.74 ± 0.01^{ab}	5.91 ± 0.02^{ab}	5.66 ± 0.05^{a}

2.3 SPC 替代鱼粉对黄颡鱼血清生化指标的影响

表 5 的结果表明，血清中总蛋白、白蛋白、球蛋白和甘油三酯含量及谷草转氨酶活性在各组间无显著差异($P>0.05$)。SPC 替代鱼粉水平对血清中葡萄糖、总胆固醇含量及谷丙转氨酶活性有显著影响($P<0.05$)。血清葡萄糖含量随 SPC 替代鱼粉水平的升高呈先升高后下降的趋势，当 SPC 替代鱼粉水平由 10%提高到 30%时，血清葡萄糖含量显著升高($P<0.05$)，随 SPC 替代鱼粉水平由 30%提高到 40%以上时，血清葡萄糖含量显著下降($P<0.05$)，在 SPC 替代水平为 30%时为最大值。随 SPC 替代鱼粉水平升高，血清谷丙转氨酶活性总体呈上升的趋势，血清总胆固醇含量总体呈下降趋势。

表 5　大豆浓缩蛋白质替代鱼粉对黄颡鱼血清生化指标的影响

Table 5　Effects of fish meal replacement with SPC on serum biochemical indicators of juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) (n=3)

项目 Items	大豆浓缩蛋白质替代鱼粉水平 Replacement level of fish meal with SPC/%					
	0	10	20	30	40	60
总蛋白 Total protein/(g/L)	39.50±3.16	35.47±1.53	35.07±3.31	36.80±2.38	34.23±0.93	35.13±0.91
白蛋白 Albumin/(g/L)	12.37±1.07	11.40±0.20	10.90±1.05	11.47±0.68	10.60±0.00	10.73±0.25
球蛋白 Globulin/(g/L)	27.10±2.15	24.07±1.67	24.17±2.28	25.33±1.70	23.63±0.93	24.40±0.75
葡萄糖 Glucose/(mmol/L)	2.96 ± 0.15^{bc}	2.36 ± 0.43^{c}	4.13 ± 0.12^{ab}	4.99 ± 0.75^{a}	3.27 ± 1.57^{bc}	3.59 ± 0.30^{bc}
谷草转氨酶 Aspartate aminotransferase/(U/g prot)	26.49±0.70	29.69±3.20	20.38±1.48	26.29±4.72	26.55±2.98	25.67±3.56
谷丙转氨酶 Alanine aminotransferase/(U/g prot)	12.61 ± 0.07^{b}	13.22 ± 0.69^{b}	11.79 ± 1.01^{b}	13.95 ± 1.02^{ab}	13.5 ± 1.09^{b}	16.46 ± 1.47^{a}
甘油三酯 Triacylglycerol/(mmol/L)	7.63±0.34	6.86±0.10	6.27±0.85	6.31±0.22	6.81±2.65	6.81±0.02
总胆固醇 Cholesterol/(mmol/L)	6.94 ± 0.32^{a}	5.84 ± 0.07^{b}	5.15 ± 0.20^{cd}	5.17 ± 0.26^{cd}	5.73 ± 0.04^{bc}	4.76 ± 0.26^{d}

2.4 SPC 替代鱼粉对黄颡鱼肝脏抗氧化酶活性的影响

表 6 的结果表明，随 SPC 替代鱼粉水平升高，肝脏超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性及丙二醛含量有显著变化($P<0.05$)。在 SPC 替代鱼粉水平为 30%时，肝脏超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性达到最大值，肝脏丙二醛含量达到最小值。当 SPC

替代鱼粉水平不低于 20%时，肝脏超氧化物歧化酶活性升高，且显著高于对照组(P<0.05)，当 SPC 替代鱼粉水平在 10%以上时，肝脏丙二醛含量显著降低(P<0.05)。

表 6　大豆浓缩蛋白质替代鱼粉对黄颡鱼肝脏抗氧化酶活性的影响

Table 6　Effects of fish meal replacement with SPC on hepatic antioxidant enzyme activities of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) (n=3)

项目 Items	大豆浓缩蛋白质替代鱼粉水平 Replacement level of fish meal with SPC/%					
	0	10	20	30	40	60
超氧化物歧化酶 SOD/(U/mgprot)	32.05±2.25^{d}	25.72±3.06^{c}	39.96±1.28^{b}	47.14±2.88^{a}	42.86±0.90^{ab}	43.16±2.49^{ab}
过氧化氢酶 CAT/(U/mgprot)	10.28±0.46^{c}	10.57±0.19^{bc}	11.22±0.37^{ab}	12.09±0.29^{a}	10.84±0.29^{bc}	10.88±0.27^{bc}
丙二醛 MDA/(nmol/mgprot)	6.16±0.29^{a}	5.29±0.67^{b}	5.06±0.08^{bc}	4.28±0.51^{c}	5.73±0.32^{bc}	4.83±0.65^{c}

2.5　SPC 替代鱼粉对黄颡鱼消化酶活性的影响

表 7 的结果表明，胃蛋白酶活性在各组间无显著差异(P>0.05)，当 SPC 替代鱼粉水平为 30%以下时，胃蛋白酶活性基本保持恒定，当 SPC 替代鱼粉水平在 40%以上时，胃蛋白酶活性有下降趋势。SPC 替代鱼粉水平对胃淀粉酶、前肠淀粉酶和肝脏淀粉酶活性有显著影响(P<0.05)，当 SPC 替代鱼粉水平为 10%和 30%时，胃淀粉酶活性显著高于其他替代水平(P<0.05)；前肠淀粉酶活性最小的 SPC 替代鱼粉水平为 10%；肝脏淀粉酶活性在 SPC 替代鱼粉水平为 40%时为到最小值，且显著低于对照组和 SPC 替代鱼粉水平为 10%、20%和 30%时(P<0.05)。

表 7　大豆浓缩蛋白质替代鱼粉对黄颡鱼消化酶活性的影响

Table 7　Effects of fish meal replacement with SPC on digestive enzyme activities of yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*) (n=3)

项目 Items		大豆浓缩蛋白质替代鱼粉水平 Replacement level of fish meal with SPC/%					
		0	10	20	30	40	60
蛋白酶 Protease/(U/mg prot)	胃 Stomach	1.93±0.10	1.98±0.14	1.90±0.04	1.93±0.18	1.77±0.19	1.71±0.03
淀粉酶 Amylase/(U/mg prot)	胃 Stomach	1.35±0.06^{b}	1.75±0.14^{a}	1.28±0.11^{b}	1.67±0.04^{a}	1.30±0.06^{b}	1.15±0.07^{b}
	前肠 Foregut	2.29±0.02^{a}	1.84±0.25^{b}	2.07±0.05^{ab}	1.95±0.01^{ab}	2.01±0.26^{ab}	2.10±0.07^{ab}
	肝脏 Liver	0.55±0.04^{a}	0.51±0.04^{a}	0.54±0.03^{a}	0.42±0.00^{ab}	0.35±0.05^{b}	0.42±0.08^{ab}

3　讨　论

3.1　SPC 替代鱼粉对黄颡鱼生长性能、饲料利用以及形态学指标的影响

在本试验中，SPC 替代鱼粉水平对黄颡鱼成活率、摄食率、饲料效率、蛋白质效率无显著影响。但 SPC 替代鱼粉对黄颡鱼增重率和特定生长率的影响显著，且随

着 SPC 替代鱼粉水平的升高呈下降趋势。当 SPC 替代鱼粉水平不超过 20%时，增重率和特定生长率与对照组相比无显著差异，而随饲料中 SPC 替代鱼粉水平升高到 30%以上时，增重率和特定生长率显著降低，说明 SPC 可以替代 20%的鱼粉而不影响黄颡鱼的生长，更高水平的替代会对黄颡鱼的生长产生抑制作用。本试验结果与 Aragao 等[21]在塞内加尔鳎(*Senegalese sole* Kaup)、Salze 等[22]在军曹鱼(*Rachycentron canadum*)及杨英豪[13]在瓦氏黄颡鱼中的研究结果相似，即 SPC 可部分替代鱼粉而不对鱼的生长产生影响。Kaushik 等[23]在虹鳟的研究中显示，SPC 可全部替代鱼粉而不影响鱼类生长，上述差异可能是鱼龄、鱼种、投喂方法、饲料组成等不同导致的。Deng 等[16]在牙鲆(*Paralichthys olivaceuss*)、Kissinger 等[24]在长鳍鰤(*Seriola rivoliana*)与 Kissil 等[25]在乌颊鱼(*Sparus aurata* .L)的研究结果显示，随着 SPC 替代鱼粉水平增加，饲料效率显著降低。上述试验与本试验结果不同，这是因为相对于鲑科鱼类和海水鱼类而言，淡水鱼类饲料中进行鱼粉替代面临的挑战相对较小，同时本试验的试验组中添加了蛋氨酸和赖氨酸 2 种必需氨基酸使得各组饲料中的蛋氨酸与赖氨酸含量基本一致，从而保证了这 2 种必需氨基酸的基本平衡[26]。此外，饲料成分也会对生长产生影响，本试验配方中添加了鱿鱼粉，鱿鱼粉具有较强的诱食作用，添加在亲鱼配合饲料中，可提高产卵质量[27]。刘兴旺等[12]在大菱鲆的研究中发现，SPC 对大菱鲆摄食率的影响是限制其替代鱼粉的主要因素。本试验中，随着 SPC 替代鱼粉水平的升高，摄食率没有显著变化，表明配方中的鱿鱼粉对 SPC 导致的适口性下降起到一定的改善作用。在应用动植物蛋白质源替代鱼粉的饲料配方中添加具有诱食作用的原料也至关重要。

有研究发现，摄食以豆粕为主要蛋白质源的饲料时，大西洋鲑(*Salmo salar*.L)[28]和虹鳟(*Onchorynchus mykiss*)[29]出现了肠炎等健康问题，Storebakken[30]在研究中发现大豆类蛋白质源中非淀粉多糖会引起肠炎从而使脂肪吸收率下降。本试验中，当 SPC 替代鱼粉水平为 10%~60%时，全鱼粗脂肪含量随 SPC 替代鱼粉水平的增加而下降，黄颡鱼肥满度、脏体比和肠脂比的变化趋势与其基本一致，可能是由于植物蛋白质源对脂肪代谢的影响所致，此结果与刘兴旺等[12]在大菱鲆和 Nahashon 等[31]在黑鲷(*Acanthopagrus schlegelii*)中研究结果相似。

3.2 SPC 替代鱼粉对黄颡鱼全鱼及肌肉常规营养成分的影响

本试验结果表明，SPC 替代鱼粉水平为 10%~60%时，黄颡鱼全鱼粗脂肪含量随着 SPC 替代鱼粉水平升高呈下降的趋势。这与 Elangovan 等[32]关于饲料中添加豆粕

蛋白质对全鱼常规营养成分以及 Wang 等[33]对于饲料中不同蛋白质水平对黄颡鱼中全鱼常规营养成分所得到的研究结果相似。推测出现本试验结果的原因可能是 SPC 中含有较多的非淀粉多糖，它会引起肠炎，导致脂肪吸收率下降，从而间接影响机体粗脂肪的含量[30]。肌肉灰分含量在 SPC 替代鱼粉水平为 10%~60%时，随替代水平的增加呈下降趋势，其他鱼体和肌肉常规营养成分无显著变化，这与 López 等[34]的研究发现相似。

3.3 SPC 替代鱼粉对黄颡鱼血清生化指标的影响

动物血液中的总蛋白与总胆固醇的含量会受到蛋白质代谢、脂质代谢和碳水化合物代谢的影响[35]，总胆固醇作为脂质代谢的重要组成部分，与肝脏细胞发挥正常功能、机体脂质正常代谢息息相关，总胆固醇含量的高低变化可以反映肝脏细胞功能状态。本试验中总胆固醇含量随 SPC 替代鱼粉水平升高而下降，这与刘伟等[19]在中华鲟(*Acipenser sinensis*)和 Dias 等[36]在欧洲海鲈(*Barbodesaltus*)发现血清中甘油三酯和总胆固醇含量随 SPC 替代鱼粉水平升高逐渐下降的结果一致。一般来讲，动物蛋白质原料中含有较高的胆固醇，而植物蛋白质原料中胆固醇含量很低[37]，饲料中胆固醇含量会影响养殖动物血液胆固醇含量[23,38]。有研究报道，在狼鲈饲料中使用植物蛋白质源替代鱼粉，导致血清的总胆固醇含量降低。这可能是因为胆汁盐排泄量增加，也有可能是由于胆固醇胃肠道吸收受到限制，或者是植物蛋白质源替代使得饲料中胆固醇的含量不足[39]，大部分学者认为植物蛋白质源中含有的抗营养因子等非蛋白质组分使得其具有降血液胆固醇含量的作用[40-41]。但有关植物蛋白质源中抗营养因子是否会干扰鱼类胆固醇代谢，目前还没有定论。葡萄糖是鱼体营养指标之一，也是反映动物糖代谢和全身组织细胞功能状态以及内分泌机能的一个重要指标。在一定的阈值内，血液葡萄糖含量越高，表明鱼类摄食越积极，健康状况良好。但当葡萄糖含量超过一定阈值时，会造成机体的营养生理胁迫，损害鱼体健康[42]。在本试验中，当 SPC 替代鱼粉水平为 20%和 30%时血清葡萄糖含量显著高于对照组，而在 SPC 替代鱼粉水平超过 30%时，增重率和特定生长率也显著低于对照组，说明 SPC 替代鱼粉水平超过 30%时，SPC 会通过影响鱼体的糖脂代谢进而影响鱼的生长。

谷草转氨酶和谷丙转氨酶是参与体内氨基酸、蛋白质、脂质、糖类代谢的重要酶，谷草转氨酶主要与草酰乙酸与谷氨酸间的转氨反应有关，谷丙转氨酶则主要参与丙酮酸和谷氨酸之间的转氨作用[43]。谷丙转氨酶正常情况下主要存在于肝细胞

中，而谷草转氨酶主要存在于肝细胞线粒体，它们在血清中的含量很低，只有在肝功能发生障碍时才会大量进入血液，使血清酶活性增加[44]。血清谷丙转氨酶和谷草转氨酶可作为反映肝功能的重要指标。在本试验中，当 SPC 替代鱼粉水平不超过 40%时，血清谷丙转氨酶和谷草转氨酶活性与对照组间差异不显著，但当 SPC 替代鱼粉水平为 60%时，血清谷丙转氨酶活性显著高于对照组。这一结果表明当 SPC 替代鱼粉水平不超过 40%时，未造成鱼体肝脏损伤，这可能是由于 SPC 中含有的抗营养因子含量极低，从而减小了对肝功能的影响。有研究发现，添加过多的豆粕会导致军曹鱼肝胰脏受损，引发功能性障碍[45]。植物蛋白质源中的抗营养因子可能是造成免疫指标变化的主要原因[46]。当 SPC 替代鱼粉水平为 60%时可能是因为高水平的 SPC 替代鱼粉使得氨基酸代谢增强，产生更多的代谢废物，造成肝脏的负担，从而导致血清谷丙转氨酶活性的上升。关于这方面的原因还有待进一步的探究。

3.4　SPC 替代鱼粉对黄颡鱼抗氧化酶活性的影响

超氧化物歧化酶和过氧化氢酶是生物防御体系中的关键酶，分别可以清除生物体内的超氧阴离子、过氧化氢，减少自由基对机体的危害，从而反映了鱼体的抗应激能力，丙二醛是机体内自由基作用于脂肪发生过氧化反应的氧化终产物，具有细胞毒性[47]，其含量可反映机体中脂质过氧化程度以及细胞的损伤程度[48]。本试验中，SPC 替代鱼粉水平对血清超氧化物歧化酶和过氧化氢酶活性以及丙二醛含量均有显著影响。当 SPC 替代鱼粉水平不低于 20%时，血清超氧化物歧化酶活性显著高于对照组，血清过氧化氢酶活性在 SPC 替代鱼粉水平为 20%和 30%时显著高于对照组，当 SPC 替代鱼粉水平在 10%以上时，血清丙二醛含量显著降低。以上结果说明，SPC 替代鱼粉水平为 20%和 30%时显著提高了鱼体抗氧化能力。这可能与 SPC 中含有大豆异黄酮有关，大豆异黄酮具有抗氧化活性以及较强的超氧阴离子自由基清除作用[49]。

3.5　SPC 替代鱼粉对黄颡鱼消化酶活性的影响

消化酶是检测鱼类的消化能力及饲料利用的关键酶，同种鱼类中不同部位的消化酶活性不同，其活性与食性有关[50]。淀粉酶的作用是催化淀粉水解，使得碳水化合物降解为糖，提高鱼类对碳水化合物的利用率[51]。本试验中，肠道淀粉酶活性明显高于肝胰脏淀粉酶活性，这与吴婷婷[52]与 Hidalgo 等[53]在其他鱼类中的研究结果一致。黄颡鱼属于肉食性鱼类，其淀粉酶生成的主要部位不是肝胰脏[54]。当 SPC 替代鱼粉水平为 30%~60%时，肝脏淀粉酶活性低于对照组。杨英豪[9]通过组织切片观察发现，随着 SPC 替代鱼粉水平的提高，伴随有肠炎的发生，饲料中 SPC 对瓦氏黄

鳜鱼肝脏组织结构的破坏程度逐渐加大。所以推测在本试验中这可能是由于饲料中 SPC 替代鱼粉水平的提高，导致鱼体肝脏组织结构受到一定程度的破坏。试验组前肠淀粉酶活性均低于对照组，且在 SPC 替代鱼粉水平为 10%时出现显著差异，这可能是因为饲料中 SPC 损害了后肠结构的稳定性，抑制了酶活性。当 SPC 替代鱼粉水平低于 30%时，胃蛋白酶活性基本保持不变，在 30%~60%时，胃蛋白酶活性下降，Lin 等[55]在罗非鱼和 Xu 等[56]在史氏鲟中的研究显示，随豆粕替代鱼粉水平的升高蛋白酶活性降低，与本试验中的结果相似。这说明黄颡鱼的胃对 SPC 比较敏感，当 SPC 替代鱼粉水平低于 30%时，黄颡鱼胃消化吸收能力受到的影响较小。今后评估植物蛋白质源替代鱼粉时，要考虑其对鱼体肝脏胃肠道等的影响机制。

4 结 论

SPC 是优质的植物蛋白质源，SPC 替代鱼粉水平不超过 20%(对应饲料中 SPC 的添加量为 10.72%)时，黄颡鱼生长性能、饲料利用、形态学指标、体成分、消化酶活性、总胆固醇含量变化不显著，抗氧化能力和健康状况良好，推荐在实际生产中采用该水平替代鱼粉。

参考文献：

[1] 白东清,吴旋,郭永军,等.长期投喂黄芪多糖对黄颡鱼抗氧化及非特异性免疫指标的影响[J].动物营养学报,2011,23(9):1622–1630.

[2] 文远红,曹俊明,黄燕华,等.黄颡鱼营养需求研究进展[J].广东农业科学,2011,38(18):108–111.

[3] ZHENG K K,ZHU X M,DONG H,et al.Effects of dietary lipid levels on growth,survival and lipid metabolism during early ontogeny of *Pelteobagrus vachelli* larvae.[J].Aquaculture,2010,299(1/2/3/4):121–127.

[4] DAVIS D A,ARNOLD C R,MCCALLUM I.Nutritional value of feed peas (*Pisum sativum*) in practical diet formulations for *Litopenaeus vannamei*[J].Aquaculture Nutrition,2015,8(2):87–94.

[5] CHENG Z Y,AI Q H,MAI K S,et al.Effects of dietary canola meal on growth performance,digestion and metabolism of Japanese seabass,*Lateolabrax japonicus*[J].Aquaculture,2010,305(1–4):102–108.

[6] LUO L,XUE M,WU X,et al.Partial or total replacement of fishmeal by solvent-extracted

cottonseed meal in diets for juvenile rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J].Aquaculture Nutrition,2010,12(6):418–424.

[7] ROBINSON E H,TIERSCH T R.Effects of long-term feeding of cottonseed meal on growth,testis development,and sperm motility of male channel catfish *Ictalurus punctatus* broodfish[J].Journal of the World Aquaculture Society,1995,26(4):426–431.

[8] CHENG Z J,HARDY R W.Apparent digestibility coefficients and nutritional value of cottonseed meal for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J].Aquaculture,2002,212(1/2/3/4):361–372.

[9] 杨英豪.大豆浓缩蛋白对瓦氏黄颡鱼幼鱼摄食、生长、消化和蛋白质代谢的影响[D].硕士学位论文.青岛:中国海洋大学,2011.

[10] 李二超,陈立侨,彭士明,等.大豆浓缩蛋白作为水产饲料蛋白源的评价[J].水产养殖,2005,26(1):18–20.

[11] LUSAS E W,RIAZ M N.Soy protein products:processing and use[J].The Journal of Nutrition,1995,125(3 S):573S–580S.

[12] 刘兴旺,艾庆辉,麦康森,等.大豆浓缩蛋白替代鱼粉对大菱鲆摄食、生长及体组成的影响[J].水产学报,2014,38(1):91–98.

[13] 杨英豪.大豆浓缩蛋白调控瓦氏黄颡鱼幼鱼摄食和蛋白质代谢的研究[D].博士学位论文.青岛:中国海洋大学,2014.

[14] STOREBAKKEN T,REFSTIE S,RUYTER B.Soy products as fat and protein sources in fish feeds for intensive aquaculture[J].Soy in Animal Nutrition,2000:127–170.

[15] 李林桂,肖伟伟,葛梦兰.大豆浓缩蛋白的生产工艺、营养组成及在动物日粮中的应用[J].饲料工业,2015,36(S1):29–32.

[16] DENG J M,MAI K S,AI Q H,et al.Effects of replacing fish meal with soy protein concentrate on feed intake and growth of juvenile Japanese flounder,*Paralichthys olivaceus*[J].Aquaculture,2006,258(1/2/3/4):503–513.

[17] USTAOGLU S,RENNERT B.The apparent nutrient digestibility of diets containing fish meal or isolated soy protein in sterlet (*Acipenser ruthenus*)[J].International Review of Hydrobiology,2002,87(5/6):577–584.

[18] ROMARHEIM O H,SKREDE A,GAO Y L,et al.Comparison of white flakes and toasted

soybean meal partly replacing fish meal as protein source in extruded feed for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J].Aquaculture,2006,256(1/2/3/4):354–364.

[19] 刘伟,文华,蒋明,等.大豆浓缩蛋白对中华鲟幼鱼生长、血脂和体成分的影响研究[J].淡水渔业,2010,40(4):27–32.

[20] 黄文文,李弋,周歧存.不同品质鱼粉对黄颡鱼幼鱼生长性能、饲料利用及肝脏抗氧化能力的影响[J].动物营养学报,2015,27(12):3744–3753.

[21] ARAGAO C,LEC C,DIAS J,et al.Soy protein concentrate as a protein source for Senegalese sole (*Solea senegalensis* Kaup 1858) diets:effects on growth and amino acid metabolism of postlarvae.[J].Aquaculture Research,2004,34(15):1443–1452.

[22] SALZE G,MCLEAN E,BATTLE P R,et al.Use of soy protein concentrate and novel ingredients in the total elimination of fish meal and fish oil in diets for juvenile cobia,*Rachycentron canadum*[J].Aquaculture,2010,298(3/4):294–299.

[23] KAUSHIK S J,CRAVEDI J P,LALLES J P,et al.Partial or total replacement of fish meal by soybean protein on growth,protein utilization,potential estrogenic or antigenic effects,cholesterolemia and flesh quality in rainbow trout,*Oncorhynchus mykiss*[J].Aquaculture,1995,133(3/4):257–274.

[24] KISSINGER K R,GARCÍA-ORTEGA A,TRUSHENSKI J T.Partial fish meal replacement by soy protein concentrate,squid and algal meals in low fish-oil diets containing *Schizochytrium limacinum*,for longfin yellowtail *Seriola rivoliana*[J].Aquaculture,2016,452:37–44.

[25] KISSIL G W,LUPATSCH I,HIGGS D A,et al.Dietary substitution of soy and rapeseed protein concentrates for fish meal,and their effects on growth and nutrient utilization in gilthead seabream *Sparus aurata* L[J].Aquaculture Research,2000,31(7):595–601.

[26] AI Q H,XIE X J.Effects of replacement of fish meal by soybean meal and supplementation of methionine in fish meal/soybean meal-based diets on growth performance of the southern catfish *Silurus meridionalis*[J].Journal of the World Aquaculture Society,2010,36(4):498–507.

[27] FERNÁNDEZ-PALACIOS H,IZQUIERDO M,ROBAINA L,et al.The effect of dietary protein and lipid from squid and fish meals on egg quality of broodstock for gilthead

seabream (*Sparus aurata*)[J].Aquaculture,1997,148(2/3):233–246.
[28] BAEVERFJORD G,KROGDAHL A.Development and regression of soybean meal induced enteritis in Atlantic salmon,*Salmo salar* L.,distal intestine:a comparison with the intestines of fasted fish[J].Journal of Fish Diseases,2010,19(5):375–387.
[29] BUREAU D P,HARRIS A M,CHO C Y.The effects of purified alcohol extracts from soy products on feed intake and growth of chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) and rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J].Aquaculture,1998,161(1/2/3/4):27–43.
[30] STOREBAKKEN T,SHEARER K D,ROEM A J.Availability of protein,phosphorus and other elements in fish meal,soy-protein concentrate and phytase-treated soy-protein-concentrate-based diets to Atlantic salmon,*Salmo salar*[J].Aquaculture,1998,161(1/2/3/4):365–379.
[31] NAHASHON S N,KILONZO-NTHENGE A K.Advances in soybean and soybean by-products in monogastric nutrition and health[M]//EL-SHEMY H.Soybean and nutrition.[S.l.]:InTech,2011.
[32] ELANGOVAN A,SHIM K F.The influence of replacing fish meal partially in the diet with soybean meal on growth and body composition of juvenile tin foil barb (*Barbodes altus*)[J].Aquaculture,2000,189(1/2):133–144.
[33] WANG C F,XIE S Q,ZHU X M,et al.Effects of age and dietary protein level on digestive enzyme activity and gene expression of *Pelteobagrus fulvidraco* larvae[J].Aquaculture,2006,254(1/2/3/4):554–562.
[34] LÓPEZ L M,FLORES-IBARRA M,BAÑUELOS-VARGAS I,et al.Effect of fishmeal replacement by soy protein concentrate with taurine supplementation on growth performance,hematological and biochemical status,and liver histology of totoaba juveniles (*Totoaba macdonaldi*)[J].Fish Physiology and Biochemistry,2015,41(4):921–936.
[35] ANDERSEN D E,REID S D,MOON T W,et al.Metabolic effects associated with chronically elevated cortisol in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J].Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences,1993,48(9):1811–1817.
[36] DIAS J,ALVAREZ M J,ARZEL J,et al.Dietary protein source affects lipid metabolism in the European seabass (*Dicentrarchus labrax*)[J].Comparative Biochemistry and Physiology

Part A:Molecular & Integrative Physiology,2005,142(1):19–31.
[37] CHENG Z J,HARDY R W.Protein and lipid sources affect cholesterol concentrations of juvenile Pacific white shrimp,*Litopenaeus vannamei* (Boone)[J].Journal of Animal Science,2004,82(4):1136–1145.
[38] GOULDING N J,GIBNEY M J,TAYLOR T G,et al.Reversible hypercholesterolaemia produced by cholesterol-free fish meal protein diets[J].Atherosclerosis,1983,49(2):127–137.
[39] KAUSHIK S J,COVÈS D,DUTTO G,et al.Almost total replacement of fish meal by plant protein sources in the diet of a marine teleost,the European seabass,*Dicentrarchus labrax*[J].Aquaculture,2004,230(1/2/3/4):391–404.
[40] HOSSAIN M A,FOCKEN U,BECKER K.Antinutritive effects of galactomannan-rich endosperm of Sesbania (*Sesbania aculeata*) seeds on growth and feed utilization in tilapia,*Oreochromis niloticus*[J].Aquaculture Research,2015,34(13):1171–1179.
[41] HANSEN A C,ROSENLUND G,KARLSEN Ø,et al.Total replacement of fish meal with plant proteins in diets for Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) Ⅰ-Effects on growth and protein retention[J].Aquaculture,2007,272(1/2/3/4):599–611.
[42] 林小植,罗毅平,谢小军.饲料碳水化合物水平对南方鲇幼鱼餐后糖酵解酶活性及血糖浓度的影响[J].水生生物学报,2006,30(3):304–310.
[43] 成艳波,张月星,董智勇,等.小麦蛋白替代鱼粉及大豆蛋白对日本黄姑鱼(*Nibea japonica*)和黑鲷(*Sparus macrocephalus*)血清生化指标及肝脏抗氧化指标的影响[J].渔业科学进展,2017,38(3):106–114.
[44] 冯建,王萍,何娇娇,等.大豆浓缩蛋白替代鱼粉对大黄鱼幼鱼生长、体成分、血清生化指标及肝组织学的影响[J].中国水产科学,2017,24(2):268–277.
[45] 王广军,吴锐全,谢骏,等.军曹鱼饲料中用豆粕代替鱼粉的研究[J].大连海洋大学学报,2005,20(4):304–307.
[46] 于晓彤.不同蛋白源对草鱼摄食反应、免疫应答及肉质的影响研究[D].硕士学位论文.北京:中国农业科学院,2016.
[47] 付晶晶,黄燕华,曹俊明,等.五种植物蛋白源替代鱼粉对花鲈血清生化指标、转氨酶活性及抗氧化应激参数的影响[J].湖北农业科学,2015,54(20):5087–5091,5095.
[48] 周显青,梁洪蒙.拥挤胁迫下小鼠肝脏脂质过氧化物含量和抗氧化物酶活性的变化[J].动

物学研究,2003,24(3):238–240.

[49] 石冬冬.大豆异黄酮的提取纯化工艺及其抗氧化性的研究[D].硕士学位论文.哈尔滨:东北农业大学,2002.

[50] 钱曦,王桂芹,周洪琪,等.饲料蛋白水平及豆粕替代鱼粉比例对翘嘴红鲌消化酶活性的影响[J].动物营养学报,2007,19(2):182–187.

[51] 吴莉芳,秦贵信,赵元,等.饲料中去皮豆粕替代鱼粉比例对草鱼消化酶活力的影响[J].中国畜牧杂志,2010,46(1):23–27.

[52] 吴婷婷,朱晓鸣.鳜鱼、青鱼、草鱼、鲤、鲫、鲢消化酶活性的研究[J].中国水产科学,1994,1(2):10–17.

[53] HIDALGO M C,UREA E,SANZ A.Comparative study of digestive enzymes in fish with different nutritional habits.Proteolytic and amylase activities[J].Aquaculture,1999,170(3/4):267–283.

[54] AGRAWAL V P,SASTRY K V,KAUSHAB S K.Digestive enzymes of three teleost fishes[J].Acta Physiologica Academiae Scientiarum Hungaricae,1975,46(2):93–98.

[55] LIN S M,LUO L.Effects of different levels of soybean meal inclusion in replacement for fish meal on growth,digestive enzymes and transaminase activities in practical diets for juvenile tilapia,*Oreochromis niloticus*×*O. aureus*[J].Animal Feed Science and Technology,2011,168(1/2):80–87.

[56] XU Q Y,WANG C A,ZHAO Z G,et al.Effects of replacement of fish meal by soy protein isolate on the growth,digestive enzyme activity and serum biochemical parameters for juvenile Amur sturgeon (*Acipenser schrenckii*)[J].Asian-Australasian Journal of Animal Sciences,2012,25(11):1588–1594.

Effects of Fish Meal Replacement with Soybean Protein Concentrate on Growth Performance, Feed Utilization and Digestive Enzyme and Antioxidant Enzyme Activities of Yellow Catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)

LI Chenchen HUANG Wenwen JIN Min ZHU Tingting LUO Jiaxiang MA Hongna YUAN Ye ZHOU Qicun*

(*Laboratory of Fish Nutrition*, *School of Marine Sciences*，*Ningbo University*，*Ningbo* 315211，

*Corresponding author, professor, E-mail: zhouqicun@nbu.edu.cn (责任编辑 王智航)

China)

Abstract: This trial was conducted to evaluate the effects of fish meal replacement with soybean protein concentrate (SPC) on growth performance, feed utilization, enzyme and antioxidant enzyme activities of yellow catfish, *Pelteobagrus fulvidraco*. Six iso-nitrogenous and iso-lipid diets were were formulated to contain different levels of SPC replacing fish meal, which were 0, 10%, 20%, 30%, 40% and 60%, respectively. A total of 540 juvenile yellow catfish with an initial body weight of (2.17±0.02) g were randomly divided into 6 groups with 3 replicates per group and 30 yellow catfish for each replicate (breeding bucket). The trial lasted for 8 weeks. The results showed as follows: 1) with the increase of replacement level of fish meal with SPC, survival rate, feed efficiency (FE), protein efficiency ratio (PER), condition factor (CF), intraperitoneal fat ratio (IPE) and viscerosomtic index (VSI) of yellow catfish were not significantly changed (P>0.05). When replacement level of fish meal with SPC was less than 20%, weight gain ratio (WGR) and specific growth rate (SGR) were not significantly changed (P>0.05), while when the replacement level was more than 30%, the above two indicators were significantly decreased (P<0.05). 2) Replacement level of fish meal with SPC had no significant effects on dry matter, crude protein and ash contents in whole body, and dry matter, crude protein and crude lipid contents in muscle (P>0.05). When replacement level of fish meal with SPC increased from 10% to 20% and 30%, crude lipid content in whole body was significantly decreased (P<0.05); when replacement level of fish meal with SPC increased from 10% to more than 20%, ash content in muscle was significantly decreased (P<0.05). 3) Replacement level of fish meal with SPC had significant effects on serum glucose (GLU), total cholesterol (TC) contents and aminotransferase (ALT) activity (P<0.05). Serum GLU content was the highest when replacement level of fish meal with SPC was 30%; with the increase of replacement level of fish meal with SPC, serum ALT activity showed increasing tendency, and serum TC content showed decreasing tendency. 4) Serum superoxide dismutase activity (SOD) and catalase (CAT) activities reached the highest when replacement level of fish meal with SPC was 30%, and malondialdehyde (MDA) content reached the lowest, which was significantly from those in control group (P<0.05). 5) There was no significant difference in pepsin (PEP) activity among groups (P>0.05); replacement level of fish meal with SPC had significant effect on amylase activity in stomach, foregut and liver (P<0.05);

when replacement level of fish meal with SPC was 10%, amylase activity in stomach reached the highest, and amylase activity in foregut reached the lowest; when replacement level of fish meal with SPC was 40%, amylase activity in liver reached the lowest. The present study indicate that fish meal replacement with 20% SPC (dietary SPC supplemental level was 10.72%) has no bad effects on growth performance, digestive enzyme and antioxidant enzyme activities

Key words: *Pelteobagrus fulvidraco*; soybean protein concentrate; growth performance; feed utilization; enzyme activity